因應氣候變遷水資源短缺情境下之水稻田灌溉策略 –論通氣式及乾濕交替式水稻栽培策略

楊純明*
行政院農委會農業試驗所作物組

摘要

水是生命和農業之源，氣候的快速變遷導致水的不足或過多，非但形成水文災害，也造成農業生產及糧食安全危機。如何針對氣候變遷水資源短缺情境研擬因應解決策略，不單是農業問題，更是關乎人類生存與生活的重大議題。本文以臺灣最重要的糧食作物水稻作為藥引，勾勒可行的水稻田灌溉策略輪廓，期以識者迴應以更宏遠的糧食安全通盤考量，以健康、富麗、安全願景的實現讓國人從此過著幸福快樂的日子。

關鍵詞： 氣候變遷、水資源短缺、水稻田、灌溉策略、通氣式栽培、乾濕交替式灌溉。

Rice Irrigation Strategies in Response to Water Shortage Scenario under Climate Change: Using aerobic and alternate wetting and drying strategies for rice cultivation

Chwen-Ming Yang*

Crop Science Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Wufeng, Taichung Hsien 41362, Taiwan ROC

ABSTRACT

Water is essential for life, for agriculture. The potential threats of water shortage or flooding projected from rapid climate change are very likely raising severe hydrological hazard in many parts of the world. The agricultural production is expected to be affected and so is food security. The impacts yielded from the scarcity of water are among the prospects of climate change need to be carefully deal with, and the related issues are not simply agriculture-oriented but to all aspects of human living. We try to focus on rice production and use it as an example to review and discuss the techniques and strategies suitable for water- / irrigation-saving purpose in response to climate change. We do hope that the important points mentioned in the paper would help to reduce the increasing socio-economic and ecological disturbances and risks on Taiwan, though they are great challenges.

Key words: Climate change, Water resource shortage, Rice paddy, Irrigation strategy, Aerobic cultivation, Alternate wetting and drying irrigation.

前言

自 19 世紀下半葉工革命業以來，人類文明飛速的演進，卻也伴隨地球生態環境的迅速改變。從大自然界的觀點，作物栽培、森林砍伐、河川截流、都市形成、交通建設、經濟發展...等文明的軌跡，均屬於對生態的破壞及環境的污染，終究將會導致自食惡果的結局。證諸於近百年來生態環境的逐漸劣質化，加上科學數據的反應，地球確已接近難以回復常態運轉的地步，而走向無以預測未來的轉捩期。其中，氣候的異常及天氣的極端化，即為一項明證。顯然人類活動的影響(human influences)超過了大氣與海洋的交感、地表與大氣的交互作用、火山及太陽等

* 通信作者, CMYang@tari.gov.tw

投稿日期：2010 年 8 月 1 日
作物、環境與生物資訊 7:212-220 (2010)
Crop, Environment & Bioinformatics 7:212-220 (2010)
189 Chung-Cheng Rd., Wufeng, Taichung Hsien 41362, Taiwan ROC

力量的總和，促進了氣候的變遷速度。

聯合國之氣候變遷跨政府小組(Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC)的第四版報告(IPCC 2007)即指出地球氣候快速變遷的各種資料及形成緣由與解決作法，在高度工業化和文明化的潮流下，百年來大氣的溫室效應氣體(greenhouse effective gases; GHGs)濃度大幅升高，地表溫度出現了全球暖化趨勢，而氣象環境則呈現劇烈變化與變異。於是，吾人可以觀察到氣候相對於以往的顯著差異，尤其是短期天氣的變動。依照聯合國之世界氣象組織(World Meteorological Organization; WMO)定義(WMO 2010)，氣候(climate)係一段長時間(氣候統計的周期一般為 30 年)普遍的天氣狀況，相對於短期間氣象變化的天氣(weather)，乃關乎生物生存、健康及榮景的一種自然資源。氣候的混沌反映出大氣、地表及海洋串連成氣候系統能量轉變與轉換的不確定性，也間接證實人類活動力量加之於氣候系統的負面作用。長期而言，地球能量維持收支平衡，因此氣候泰半亦維持於周期循環式的穩定狀態。現階段卻因為能源使用與經濟發展引起增強的溫室效應(greenhouse effect)而影響能量平衡，改變了穩定的氣候系統，使得氣候變異增加，更形成了全球氣候異常現象(IPCC 2007, WMO 2010)。

綜合評估 IPCC (2007)的報告，可大概歸納出氣候快速變遷的 4 項後續效應: (1)天氣與氣候的不穩定、(2)極端與災害性天氣的增加、(3)海平面的上升、以及(4)生物多樣性的威脅，並且呈現於溫度、降水、冰凍層及海平面等 4 項徵狀的改變。IPCC 在地域性改變的預測上，高溫與大雨頻率的增加、熱帶颶風(颱風)強度的升高、降水(雨)與溫度型態的改變及降水在高緯度增加而副熱帶減少等現象的可能性，將潛在影響農業及糧食生產。再者，即使今日起採行調適策略，乾燥的熱帶和副熱帶地區某些區域，似仍無法避免水分的短缺及乾旱的風險。很不幸地，臺灣正巧座落於此一降水頻率與型態改變、降水量不穩定的地區，具有缺水高風險，預期在氣候快速變遷的情境下未來水資源的供需與調配問題將更加嚴重。未雨綢繆，本文據此乃嘗試整理相關文獻資料，針對氣候變遷下可能出現的水資源短缺情境，提出稻之灌溉栽培策略觀點，期以有助於國內糧食安全維護。

水對稻生產之重要性

農作物優良的品質與生產，除了自身的遺傳潛能，端賴於穩定的生長環境，包括適宜的土壤、適當的溫度及適量的水分等條件。降水量與頻率的不穩定，自會妨礙正常的作物生產，不利於國家整體糧食安全的控管。此外，工商業發達、經濟蓬勃發展的國家，用水量也會增加，以提供產業、民生與各方所需。因此，在水資源有限的情況下，必然爭相競取水源或甚至超抽地下水，反而惡化水資源的利用與管理。果若遭逢乾旱發生或額外水源需求，將面臨嚴重缺水甚或難以收拾局面，由此可知配套水利和水資源的活化及經營管理的重要。近幾十年來臺灣在各方面的發展有目共睹，人民生活獲得極顯著改善，然而在此同時也因為資源的過度消耗，出現供需失調及相對應基礎建設無以為繼、未能及時配合窘境。

水的過多或不足，都可能造成災損，因此水文災害(hydrological hazard)包含水患(floods)與乾旱(droughts)兩項。通常水患源自於過多的降水量(如降雨、降雪)、快速的雪融或冰溶，短期間在有限的地面空間蓄積過量的水造成危害；相反的，乾旱主要係長期乾燥天候使得蒸發量遠超過可利用地面水(available surface water)，因水分短缺而形成(WCRP 2010)。居於成因的瞭解，並經常性的預測、追蹤降水與蒸發量，將可避免及降低水文災害發生的措手不及。惟臺灣地狹人稠，天候的變化除了全球氣象系統的影響，尚受到鄰近大陸、海洋及境內複雜地形

地勢等因子干擾，使得人民生活、產業生產及環境生態均受制於難料的天氣與氣候起伏波動。尤其受限於海島地理與地形，臺灣的水資源十分有限，且容易受到週遭氣象環境的影響，水的利用與管理成為國家經建發展的根本要務。

稻米是亞洲住民的傳統主食，也是世界性的重要糧食，全球有超過一半的人口皆食用稻米，而稻、小麥、玉米併列世界三大糧食作物。亞洲一年生栽培稻 *Oryza sativa* 有印度型稻(*Oryza sativa* subsp. *indica*; 秈稻)、日本型稻(*Oryza sativa* subsp. *japonica* (or *sinica*); 稉稻)和爪哇型稻(*Oryza sativa* subsp. *Javanica)*三大類，非洲一年生栽培稻則為 *Oryza glaberrima*。無論何種生態型的栽培稻，稻米的生產有灌溉(irrigation)、淹灌(flooding)、靠天水灌(rainfed)與陸生(upland)等栽培方式，而以灌溉栽培的生產面積(約 7,900 萬公頃)佔了稻米生產總面積(約 14,700 萬公頃)的 54%，產量則達稻米總產量的 76% (IRRI 1997, 2009a)。灌溉栽培需要大量的水源進行湛水(submerged)型式的灌溉，其灌溉水量為大麥與玉米的 2-3 倍(Bouman and Tuong 2001)，據估計在亞洲的灌溉水量中一半以上使用於灌溉式稻栽培(Barker *et al.* 1999)。

當降水不穩定或不足造成灌溉水源的短缺時，必將不利於灌溉式稻生產，也將間接提高亞洲各國糧食安全的風險。雖然各國因其自然資源豐枯的不同，科技與經濟發展的差異，以及社會穩定與政治文明的程度而有不等的影響，終究會因為缺水、乾旱導致稻作欠收(Gleick 1993, Postel 1997, Guerra *et al.* 1998)。從長治久安的立場，現在就當試以減低生產稻所需的灌溉水量，並加以提升稻株的水分利用效率，使得單位水分生產力得以提高。尤其臺灣近年來經常遭受降水過於集中，降水分佈偏頗，且降水日數下降的困境，針對氣候快速變遷引發的水源短缺問題更應予高度重視。

臺灣栽培的稻種以稉稻為主，秈稻為輔，且多在平地採用灌溉方式，故以「水稻」稱之。從南到北水稻概採灌水式栽培，生育過程幾乎都‘浸泡’在水中，從水田整地、秧苗建立、植株生長、分化、穗形成與抽出、直至穀粒充實等環節的進展，莫不需要充足的水分以順利進行。舉例而言，移植或直播前整地成泥漿狀的水田，必須灌溉大量的水源耕犛如泥布丁，如此以獲得雜草控制、增加土壤水分含量、降低土壤透水性、助益於田區整平及插秧(De Datta 1981)。在稻株生育期間則需要持續地注入田水，來維持湛水深度 3-5 (乃至 10) cm，可以想見耗費水量的龐大。其次，這些立態的灌溉水又得扣抵各種外流(outflows)耗損，如垂直向下的滲漏(percolation)、橫向的滲流(seepage)、多向溢出田埂的地表逕流(surface runoff)、氣態揮發向上的蒸發(evaporation)及經由根系與植體輸導逸散至大氣的蒸散(transpiration)等多維面向的離開土壤，加總起來的灌溉水量單季高達 1,000-2,000 nm (Tuong and Bouman 2003)。雖然實際由稻株吸收利用於植體生育的水量相對於全期灌溉量的比例甚低，惟當任一環節的灌溉水量未盡充分時，稻株的生育即可能受到阻滯或抑制，彰顯於外觀形態的異常。當缺水時間拉長或程度加重時，除了營養器官的生質量將減少，產量亦會降低。對水稻而言，特別是生殖生長期的缺水(如幼穗分化期、穀粒充實期)，減產情節更是明顯。

氣候變遷水資源短缺情境下之水稻田灌溉策略

由於氣候變遷所造成的水分稀少或短缺，將衝擊亞洲傳統的灌溉式、淹灌式乃至於看天雨灌式水稻栽培系統(IRRI 2009b)，因此吾人應當及早謀求以較少的水源從事水稻栽培的因應對策。針對氣候變遷引起的降水不確定性及特定地帶降水量下降的可能威脅，實際上世界各地皆已警覺而努力於節約

灌溉水量，先進國家和穀物大宗生產國更是不遺餘力的採行節水方法(Bouman and Tuong 2001, IPCC 2001a, 2001b, Tabbal *et al.* 2002, IPCC 2007)。近年國內 Yang (2007)曾從文獻整理適用於個別農田(field)及流水域(watershed)的節水栽培技術與策略(water-saving technologies and strategies)，特別詳細介紹了短缺式灌溉(deficit irrigation)、乾濕交替式灌溉(alternate wetting and drying irrigation)的做法和優缺點，該篇回顧報告另提出通氣式栽培(aerobic cultivation)水稻的建議。由於這些具有永續農業發展的節水灌溉技術與策略符合當前需求，特別在氣候變遷造成水資源短缺情境的高可能性前提，本文於是不厭其煩的再就採用通氣式及乾濕交替式來栽培水稻的相關議題做進一步探討，期以有助於國內更深入的研究與未來應用。

1. **通氣式水稻栽培** (aerobic rice cultivation)

自 2001 年起位於菲律賓的國際稻米研究所(International Rice Research Institute; IRRI)即進行所謂通氣式的水稻栽培模式研究，嘗試將水稻栽培於非灌溉及非先行水田整地過的土壤中，而以輔助式的灌溉提供稻株水分(IRRI 2001)。經比較參試陸稻與雜交水稻在通氣式(維持土層 15 cm 深之水分張力於 30 kPa)和淹灌式栽培之產量及水分使用,發現前者產量下降 14-40% (約 2.4-4.4 Mg ha^{-1})，而灌溉水量則為 650-830 mm 比 1,350 mm (Castaneda *et al.* 2002)。有鑑於水分使用量的減少大於產量之下降幅度，經計算通氣式栽培的水分生產力(water productivity)高於淹灌方式栽培約 20-40%，其中一處理區甚至高達 80%。Martin *et al.* (2007)之研究指出，相對於灌溉式栽培，通氣式栽培水稻之灌水量減少 50%、水分生產力超過 60%。然而採行通氣式水稻栽培有其先決條件，包括選育適合的通氣型稻種(aerobic rice)及發展相配套的水分與栽培管理措施，如此才能適應此一非慣行的栽植與土壤環境(Bouman and Tuong 2001, Bouman *et al.* 2002a, 2002b, Vial 2005)。

所謂的"通氣式栽培"，簡單的說就是以旱作的方式栽培水稻，一如小麥、玉米等旱作物在非湛水或非淹灌的狀態下進行水稻的栽培管理。如此一來，縱向滲漏、橫向滲流、向上蒸發均將大幅降低，最耗水的水田整地將可避免，灌溉水量自然減低許多。但是，為了在最少水源投入的不利環境中維持可接受的起碼產量與品質，關鍵和必要時期的供水絕對不可少，而且需要建立一套配適的行株距、肥料、雜草與病蟲源管理措施。早在 1973 年即有研究報告指出，若逕將適合灌溉栽培的高產水稻改以通氣式，固然灌溉用水大減，產量卻也降低許多(De Datta *et al.* 1973)。農委會農業試驗所於 1995 年兩期稻作期間曾進行類似試驗，發現以看天雨灌式的乾旱處理水稻及陸稻將會造成產量下降，然水稻減產幅度大於陸稻之減產(Lai *et al.* 1998)。由此顯示，欲以通氣式環境栽培水稻，必須先選育出合適條件之稻種，以適應特殊的生態環境、生理與代謝上的變化(Bouman and Tuong 2001, Bouman *et al.* 2002a, 2002b, Martin *et al.* 2007)，並且必須要能抗倒伏以利於營養傳導至穗穀及耐高肥施用(Castaneda *et al.* 2002)。

中國大陸曾選育適應通氣式栽培的稻種，並廣泛栽植於北方農田，其生產潛能可達 6 Mg ha^{-1}，在 2002 年栽培面積已超過 19 萬公頃(Bouman *et al.* 2002a, Wang *et al.* 2002, Yang *et al.* 2002)。南美巴西經過 20 年的育種亦選育出適用的通氣式稻種，在噴灌的方式栽培下產量約 5–7 Mg ha^{-1} (Castaneda *et al.* 2002)。兩地研究皆發現，採行通氣式栽培的產量在初期多維持在可被接受的範圍，但經過 3-4 年連續栽培後即呈顯著的衰退，推測原因可能在於土壤型病蟲害的滋長(Prot *et al.* 1994, Prot and Matias 1995)。又一般旱作栽培常見的雜草蔓延情形，也可預期會出

現在通氣式的水稻栽培田間，競爭自然資源及帶來各種病蟲源、田間小動物(如田鼠、蟋蟀)。據此，配套的病蟲草害綜合管理必須伴隨協助，乃至於合適的肥料施用，才能夠成功的長期栽植通氣水稻，尤其以雜草管理最為重要(Singh *et al.* 2008)。

通氣式的水稻栽培，可以直播方式播入種子或移植插入秧苗。為提高秧苗存活率，以秧苗移植較佳，在插秧前可先行灌溉以維持土壤濕潤或飽和狀態，插秧後灌溉 1 週並維持水深 2-3 cm (Castaneda *et al.* 2002)。若採取直播，種子可先浸種催芽後再條播植入濕土，將可提高幼苗出土率，而維持土壤水分供給無虞 1-2 週，則有助於後續秧苗建立。直播種子於不飽和土壤中，雖可節省大量灌溉水及提早成熟效果，卻必然犧牲幼苗存活率而致明顯缺株。通氣式栽培法雖近似於陸稻栽培，惟陸稻通常栽種於貧瘠、保水力差且高侵蝕的土壤、坡地或高地。尚且陸稻栽培多採粗放做法，資材及勞力投入少，因此生長不佳而產量低、品質差。若將陸稻種植於平地，以水稻慣行方式灌溉及管理，其生長性狀、產量與品質皆優於旱作栽培之產出(Lai *et al.* 1995)。以通氣式栽培之稻株表現近於灌溉式及旱作式之間，可實施於平地或梯田，在良好的管理下將有較佳的田間土壤保肥力及保水力，產量約為灌溉式水稻栽培的 70-80%。再者，可同時預期通氣式栽培還可避免灌溉式栽培之耕犁對土壤構造的破壞，確保土壤長期風化形成的生物、物理與化學性質不會遭到破壞，土壤的保肥、保水、密度、通氣及排水等能力與特性得以保留，生物多樣性獲得保障，較符合永續農業的理念。目前國內尚無專用通氣式稻種，亦未建立適用的通氣式栽培系統，有待研究單位早日規劃進行，從整地、種子或秧苗種植、行株距、灌溉、施肥、病蟲草管理直至收穫等作業均應全盤探討。

一如前述，通氣式栽培法面對的最主要課題就是雜草與品種問題(Vial 2005)。雜草的滋生除了競爭自然資源之外，將帶來嚴重的病、蟲與田間小動物危害。栽植前的土壤耕犛，幼苗出土或秧苗移植初期的淹灌，稻株生長前期的除草劑使用，以及栽培中後期的人工除草等措施，皆可防制雜草的繁衍生長(Singh *et al.* 2008)。適應通氣式栽培的稻種，必須具備以下 5 種特性: (1)耐旱性: 長期生長於有限供水的旱田狀態下，稻種必須擁有相當的耐旱性才能確保植株生育與收穫；(2)高種子發芽/出土率: 針對以種子直播可能導致的缺株問題，稻種必須具有較高的發芽/出土率；(3)優越雜草競爭能力: 在面對可能雜草叢生蔓延的田間情境，如果無法和雜草相互競爭將遭淘汰；(4)高產潛能: 生活於較惡劣環境下仍能獲得適當生產，稻種必須蘊含高產遺傳潛能，諸如生育期短、根系深長、生物量大、分蘗數多及有效分蘗百分比與充實率高等，同時具旺盛的光合成與水分利用效率；(5)高品質潛力: 民眾對米質的要求日益提高，健康優質的稻種當是育種優先目標之一。

2. **乾濕交替式水稻栽培**(alternate wetting and drying rice cultivation)

採用乾濕交替灌溉方式來栽培水稻，係另一種有效節約灌溉水量的栽培技術與策略(IRRI 2009b)。利用停灌及復灌兩種作業交替方式來實施田間灌溉，兼具有減少灌溉水量及增加土壤水分消耗量效果，可以充分的使用土壤中可利用的水分。通常田間經過一定量的灌溉之後，可顯著提升土壤水分潛勢(soil water potential)測值(即由較大負值升為較小負值)，當灌溉量使得土壤達到飽和水分含量，土壤水分潛勢測值將趨近於零。之後隨著停灌時間的增長及不間斷的土壤水分蒸發與稻株植體水分蒸散，土壤水分含量將逐漸減少，直到土壤水分潛勢降至預設值後再行復灌。國際稻米研究所研發之乾濕交替灌溉方法，其灌溉量以達湛水 1-2 cm 為準，停灌時間(可能 1-10 天或以上)則以田面無餘

水為度，然後再重新灌水(IRRI 2009b)。而如此藉由停灌與復灌之乾濕交替，讓水稻能夠在此水分含量變化範圍內生長與發育，完成生活世代。

根據試驗結果，乾濕交替式的水稻栽培法可以減少灌溉水的施用，並且提高稻株水分利用效率(Barker *et al.* 2001, Huan *et al.* 2008)。至於是否會造成水稻的減產，端視土壤水分管理的良窳而定，即持續維持土壤水分含量於造成稻株生長負面效應的臨界值之上，則不至於干擾稻株正常生育。其次關鍵點，在對缺水高度敏感的穗形成期間(自幼穗分化至抽穗期)，必須保持適度的土壤含水量，至抽穗後再恢復交替式灌溉。交替式灌溉栽培法可實施於直播稻或移植稻，倘若遇有雜草問題，則可以先行湛水一段時間有效抑制雜草後，再重新進行乾濕交替。在氣候變遷可能形成水資源短缺的危機下(IPCC 2007, IRRI 2009b)，妥善的實施交替式灌溉來生產水稻，不僅能夠減少灌溉水的需求，也能保持稻米生產的不虞匱乏，不失為一雙贏的灌溉策略。

比照通氣式栽培法對稻種的特殊要求，適用於乾濕交替灌溉栽培法的水稻品種，亦必須具備若干特性以竟其功。如同通氣式稻種，首先為機能完善而活力旺盛的根系(Vial 2005)，稱職扮演固定植株、吸收水分與營養元素、合成植物荷爾蒙等重要角色，以配合生長與生產所需的高效光合作用。經由混合施用有機與無機肥料來適度的提升根系的生質量、密度、深度及活性，將能促進根系的各項功能而利於稻株生育(Yang *et al.* 2004)。又交替式灌溉及通氣式培栽均有肥料流失問題(Huan 2008)，尤其是氮肥在還原(脫氮作用)與氧化(硝化作用)交替狀況下，氮素極容易以氣體(如 NO、NO_2、N_2O)自土壤逸釋至大氣，硝酸態氮亦會隨著灌溉水往底土層滲漏或橫向滲流。如何避免或減少交替式灌溉的氮流失，成為另項採行此一栽培方法的重要考量，將氮肥施用於灌水前或施予緩效性氮肥等，都是值得探討的研究題目。

再從水稻田溫室氣體排放觀點，交替式灌溉栽培雖然縮短了田間無氧湛水時間而減少了甲烷的生成，但是卻也因為停灌通氣延長田間處於有氧狀態而促進氧化亞氮生成。而促使好氧菌降解土壤內的有機質，形成穩定的腐殖質，也同時避免了無氧發酵，便不會促成甲烷的產生。因此停灌與復灌兩者之間的取捨與調適，又是另外一項有待解決的課題。

農田水利的角色

近年來臺灣的降水漸有豐枯期兩極化現象，偶又因颱風或季節風帶來的短期集中降雨，如此的降水(雨)在時間與空間分佈上的不均，加上河川坡陡水急、地質脆弱不易保存，造成水源供應與調配難題。在各產業競相爭水以配合國家經濟建設發展下，不僅突顯處理水資源分配運用問題的重要，也彰顯農田水利的關鍵地位。農田水利平時的重點在於提供農業用水、其他標的用水需求及生態環境與景觀維護，雨季在於發揮調洪、減洪及滯洪效果，旱季則必須犧牲小我將部分水源調撥予民生及工商使用。固然早期的水源開發與水權主要來自於滿足農田水利所需，現階段卻因農業產值比例的下降，成為各方窺覬及檢討的對象。在水源不敷使用時，被迫採取輪灌、休耕、停作來供給非農業標的支應，使得農業更進一步的被弱勢化。然而從國家總體經濟和糧食安全主軸而言，仍應兼顧糧食生產與維護民眾生活空間福祉，維持必要的農業存在、農業產出及農業環境，農業用水不應被忽略。在「農業水資源合理化利用」議題規劃上，關於農地、農業用水、農產及糧食安全庫存等主題，必須要有國家級的農田水利政策來整體考量，否則將難以真正落實農田水利的角色與定位。本文主標題「因應氣候變遷水資源短缺情境下之水稻田灌溉策略」，即屬於此一農業政策下的小題，並牽引相關的試驗研究方向調整。

國內農田水利會係以秉承政府推行農田水利事業為宗旨而成立的公法人，以承辦農田水利事業之興辦、改善、保養及管理事項，以及農田水利事業災害之預防及搶救事項等等多項任務為主。在主管機關農委會依法交辦事項當中，「節水」是其中重要任務之一，各地農田水利會亦長期以"輪灌"作為主要措施，近年又以"休耕"作為乾旱期間的因應手段。隨著時勢的變遷及經濟部水利署的成立，水利署成為國家水利機關事權統一單位，在分隸不同主管機關而事權部分重疊情況，如何盡心輔導、委託分工、建立協調機制，讓「農田水利」和「農田水利會」不僅獲得『關愛的眼神』繼續發揮農田水利事業任務的成效，更能夠為國治水、為民興利、為子孫開萬世太平，應是主管官署共同承擔的一項重責大任。

其實，農田水利的重要目的應當在於『用水』而非『節水』、著重『調節』而非『防災』，為了獲得最大水源和最多使用，「開源」與「蓄水」當居業務首位，其間奧妙繫於一心。收集降水、河川水、餘水(非直接利用於灌溉的水源)、廢水(需要回收或去污除毒的水源)蓄積於池塘、湖泊、水庫及地下，修改水權定義、登記、使用等內容，以及推動使用者付費原則，才是水資源活化與有效利用的最佳理念、最高境界。

結語

水是農業之源，氣候的快速變遷導致水的不足或過多，非但形成水文災害，也造成農業生產及糧食安全危機。如何針對氣候變遷水資源短缺情境研擬因應解決策略，不單是農業問題，更是關乎人類生存與生活的重大議題。本文以臺灣最重要的糧食作物水稻作為藥引，勾勒可行的水稻田灌溉策略輪廓，再專論通氣式及乾濕交替式水稻栽培策略。此二項節水灌溉及栽培水稻之策略，適用臺灣的農業環境，更可以在節省灌溉水量前提從事稻米生產。雖然國人對米質有較高要求，只要建立配套的品種和栽培管理措施，仍有機會進行質優量穩的稻米生產。本文同時期望識者的迴應(響)，齊心努力以更宏遠的糧食安全通盤政策/策略，以健康、富麗、安全願景的實現，共同打造可以讓國人從此過著幸福快樂日子的美境。

誌謝

本文部分資料由國立中興大學農藝學系蘇國棟同學協助蒐集，特以致謝。

引用文獻

Barker R, D Dawe, TP Tuong, SI Bhuiyan, LC Guerra (1999) The outlook for water resources in the year 2020: challenges for research on water management in rice production. p.96-109. *In*: Assessment and Orientation Towards the 21st Century. Proceedings of the 19th session of the International Rice Commission. 7-9 September 1998, Cairo, Egypt. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.

Barker R, R Loeve, YH Li, TP Tuong (2001) Water-saving irrigation for Rice: Proceedings of an International Workshop held in Wuhan, China. 23-25 March 2001. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka. 123pp.

Bouman BAM, TP Tuong (2001) Field water management to save water and increase its productivity in irrigated rice. **Agric. Water Manage**. 49:11–30.

Bouman BAM, H Hengsdijk, B Hardy, PS Bindraban, TP Tuong, JK Ladha (2002a) Water-wise Rice Production. International Rice Research Institute/Plant Research Institute. Manila, Philippines. 356pp.

Bouman BAM, Y Xiaoguang, W Huaqui, W Zhiming, Z Junfang, W Changgui, C Bin (2002b) Aerobic rice (Han Dao): A new way growing rice in water short areas. Pp.175-181. In: Proceedings of the 12th International Soil Conservation Organization Conference. 26-31 May 2002. Tsinghua University Press, Beijing, China.

Castaneda AR, BAM Bouman, S Peng, RM

Visperas (2002) The potential of aerobic rice to reduce water use in water-scarce irrigated lowlands in the tropics. p.165-176. *In*: Water-wise Rice Production. BAM Bouman, H Hengsdijk, B Hardy, PS Bindraban, TP Tuong, JK Ladha (eds.) International Rice Research Institute/Plant Research Institute. Manila, Philippines.

De Datta SK, HK Krupp, EI Alvarez, SC Modgal (1973) Water management in flooded rice. p.1-18. *In*: Water management in Philippine irrigation systems: research and operations. IRRI. Los Baños, Philippines.

De Datta SK (1981) Principles and Practices of Rice Production. IRRI, Los Baños, Philippines. 618pp.

Gleick PH (1993) Water crisis: a guide to the world's fresh water resources. Pacific Institute for Studies in Development, Environment, and Security. Stockholm Environment Institute. Oxford University Press, New York. 473pp.

Guerra LC, SI Bhuiyan, TP Tuong, R Barker (1998) Producing more rice with less water from irrigated systems. SWIM Paper 5. IWMI/IRRI, Colombo, Sri Lanka. 24pp.

Huan TTN, TQ Khuong, CV Hach, PS Tan, R Buresh (2008) Effect of seeding rate and nitrogen management under two different watr regines on grain yield, water productivity and profitability of rice production. **Omonrice** 16:81-87.

Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC (2001a) Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge, U.K. 881pp.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2001b) Climate change 2001: Synthesis Report. R. Watson and the Core Writing Team (Eds.) Cambridge University Press. Cambridge, UK.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2007) Climate Change 2007 Synthesis Report: Summary for Policymakers. The Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. World Meteorology Organization. Geneva.

IRRI, International Rice Research Institute (1997) Rice almanac. 2nd ed. IRRI, Los Banos, Philippines. 181pp.

IRRI, International Rice Research Institute (1997) (2009a) IRRI World Rice Statistics (WRS). Visit on 08/28/2010. http://beta.irri.org/solutions/index.php?option=com_content&task=view&id=250

IRRI, International Rice Research Institute (2001) Annual report 2000-2001. Rice research: the way forward. IRRI. Los Baños, Philippines. 71pp

IRRI, International Rice Research Institute (2009b) Saving Water: Alternate Wetting and Drying (AWD). Visit on 08/28/2010. http://www.knowledgebank.irri.org/factsheetsPDFs/watermanagement_FSAWD3.pdf

Lai MH, CM Yang, YC Kuo (1995) Variation in growth and yield between lowland and upland rice varieties. (in Chinese with English abstract) **J. Agric. Res. China** 44:379-390.

Lai MH, CM Yang, YC Kuo (1998) Production of lowland and upland rice to soil water deficits in different crops. I. Differences in growth and yield. (in Chinese with English abstract) **J. Agric. Res. China** 47:95-107.

Martin GJ, PK Padmanathan, E Subramanian (2007) Identification on suitable rice variety adaptability to aerobic irrigation. **J. Agric. Biol. Sci.** 2:1-3.

Postel S (1997) Last oasis: facing water scarcity. Norton and Company, New York. 239pp.

Prot JC, IMR Soriano, DM Matias (1994) Major root-parasitic nematodes associated with irrigated rice in the Philippines. **Fund. Appl. Nematol.** 17:75-78.

Prot CH, DM Matias (1995) Effects of water regime on the distribution of *Meloidogyne graminicola* and other root-parasitic nematodes in a rice field toposequence and pathogenicity of *M. graminicola* on rice cultivar UPLR15. **Nematologica** 41:219-222.

Singh S, JK Ladha, RK Gupta, L Bhushan, AN Rao (2008) Weed management in aerobic rice

systems under varying establishment methods. **Crop Prot.** 27:660-671.

Tabbal DF, BAM Bouman, SI Bhuiyan, EB Sibayan, MA Sattar MA (2002) On-farm strategies for reducing water input in irrigated rice: case studies in the Philippines. **Agric. Water Manage**. 56:93-112.

Tuong TP, BAM Bouman (2003) Chapt. 4. Rice Production in Water-scarce Environments. p.53-68. *In*: Water Productivity in Agriculture: Limits and opportunities for improvements. JW Kijne, R Barker, D Molden (eds.) CABI Publishing, England.

Vial LK (2005) Aerobic and Alternate-wet-and-dry (AWD) Systems: A report for Nuffield Australia Farming Scholars. Nuffield Australia Project No. RAMO 090, Rabobank. Australia. 43pp.

Wang H, BAM Bouman, D Zhao, C Wang, PF Moya (2002) Aerobic rice in northern China: opportunities and challenges. p.143-154. *In*: Water-wise Rice Production. BAM Bouman, H Hengsdijk, B Hardy, PS Bindraban, TP Tuong, JK Ladha (eds.) International Rice Research Institute/Plant Research Institute. Manila, Philippines.

WCRP, World Climate Research Programme (2010) Floods and Drought. Visit on 08/30/2010. http://www.wmo.int/pages/prog/wcrp/FloodsDroughts_index.html

WMO, World Meteorological Organization (2010) Themes: Climate. Visit on 08/20/2010. http://www.wmo.int/pages/themes/climate/index_en.php#

Yang X, H Wang, Z Wang, J Zhao, B Chen, BAM Bouman (2002) Yield of aerobic rice (Han Dao) under different water regimes in northern China. p.155-164. *In*: Water-wise Rice Production. BAM Bouman, H Hengsdijk, B Hardy, PS Bindraban, TP Tuong, JK Ladha (eds.) International Rice Research Institute/Plant Research Institute. Manila, Philippines.

Yang C, L Yang, Y Yang, Q Zhu (2004) Rice root growth and nutrient uptake as influenced by organic manure in continuously and alternately flooded paddy soils. **Agric. Water Manage**. 70:67-81.

Yang CM (1997) Water-saving techniques and strategies for rice cultivation under global warming trend. Pp.83-102. *In*: The Proceedings of the Syposium of Effects of Global Warming on Rice Industry in Taiwan. 26 October 1997, National Chung-Hsing University, Taichung, Taiwan. Agronomy Society of Taiwan/Hualien District Agricultural Research and Extension Station/National Chung-Hsing University, Taiwan.